 © Авторы статьи / Authors of the article

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА/TECHNOLOGIES, MACHINES AND EQUIPMENT FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.5 EDN: UGPFWW

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ ЛОКАЛИЗАЦИИ РУКИ МАНИПУЛЯТОРА ЗАРУБЕЖНЫХ ДОИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Обзор

Кузьмина Т.Н.[1, *]

[1] ORCID : 0000-0001-5789-3223;

[1] Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, Правдинский, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (tnk60[at]mail.ru)

Предложена: 27.07.2026; Принята: 18.09.2026; Опубликована: 19.10.2026

Аннотация

Технологические, физиологические и экономические преимущества во многом определяются точностью позиционирования доильных стаканов, на которую влияют разброс координат и размеров сосков вымени, возможные перемещения животного в процессе обслуживания. В доильных роботах для размещения руки манипулятора с доильными стаканами применяются системы локализации, использующие различные способы получения и обработки изображения: трёхуровневое лазерное сканирование (TDS), с использованием 3D-камер ToF (Time-of-Flight), ультразвуковые и оптические датчики, фототехнологии. Данные технологии имеют как достоинства, так и недостатки.

Для минимизации последних производители используют гибридный подход, суть которого состоит в дополнении одной технологии другой. Так, для достижения максимальной точности производители часто дополняют оптические датчики ультразвуковыми, лазерными сканерами и ToF-камерами, а ToF-камеры комбинируют с RGBD-камерами (для повышения разрешения и точности), лазерными сканерами (для точечного сканирования), ультразвуковыми датчиками (для работы в сложных условиях), системами ИИ (для улучшения алгоритмов распознавания). Благодаря этому удается повысить точность и степень разрешения получаемого изображения при определении положения сосков вымени коровы.

Проведенный анализ показал, что использование гибридного подхода в технологиях локализации руки манипулятора доильного робота не решает проблему соответствия продолжительности подготовительных операций доения нормативному значению (не более 60 секунд). В этой связи возникает необходимость дополнительного изучения вопроса влияния технологий локализации руки манипулятора на продолжительность подготовительных операций доения. Дальнейшее совершенствование технологий локализации руки манипулятора доильного робота должно идти в направлении не только гибридизации подходов, повышающих точность, степень разрешения, но и разработки более совершенного алгоритма управления, сокращающего продолжительность предварительных операций.

Ключевые слова: доильный робот, манипулятор, датчик ультразвуковой, датчик оптический, видеокамера, лазерное сканирование.

TECHNICAL SPECIFICS OF THE MANIPULATOR ARM LOCALISATION SYSTEMS IN FOREIGN MILKING ROBOTS

Review article

Kuzmina T.N.[1, *]

[1] ORCID : 0000-0001-5789-3223;

[1] Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Studies on Engineering and Technical Provision of Agro-Industrial Complex, Pravdinsky, Russian Federation

* Corresponding author (tnk60[at]mail.ru)

Suggested: 27.07.2026; Accepted: 18.09.2026; Published: 19.10.2026

Abstract

Technological, physiological and economic benefits are largely determined by the accuracy of milking cup positioning, which is influenced by variations in the coordinates and dimensions of the udder teats, as well as any movements the animal may make during the milking process. In milking robots, localisation systems utilising various methods of image acquisition and processing are used to position the manipulator arm with the milking cups: three-level laser scanning (TDS), using 3D Time-of-Flight (ToF) cameras, ultrasonic and optical sensors, and photographic technologies. These technologies have both advantages and disadvantages.

To minimise these issues, manufacturers use a hybrid approach, the essence of which is to supplement one technology with another. For example, to achieve maximum accuracy, manufacturers often supplement optical sensors with ultrasonic sensors, laser scanners and ToF cameras, whilst combining ToF cameras with RGBD cameras (to improve resolution and accuracy), laser scanners (for point scanning), ultrasonic sensors (for operation in challenging conditions), and AI systems (to improve

 © Авторы статьи / Authors of the article

recognition algorithms). This makes it possible to improve the accuracy and resolution of the resulting image when determining the position of a cow's udder teats.

The analysis showed that the use of a hybrid approach in technologies for positioning the milking robot's manipulator arm does not resolve the issue of ensuring that the duration of milking preparation operations complies with the standard (no more than 60 seconds). In this regard, there is a need for further study into the impact of manipulator arm localisation technologies on the duration of milking preparation operations. Further improvements to the technologies for localising the milking robot's manipulator arm should focus not only on the hybridisation of approaches that enhance accuracy and resolution, but also on the development of a more sophisticated control algorithm that reduces the duration of preparatory operations.

Keywords: milking robot, manipulator, ultrasonic sensor, optical sensor, video camera, laser scanning.

Введение

Важную роль в процессе производства молока играет техническое оснащение, внедрение новых отечественных автоматизированных устройств, достижение технологического лидерства в этой отрасли, что является одной из национальных целей, определенных в Указе Президента №309 от 7 мая 2024 г. [1]. Благодаря мерам государственной поддержки российским сельхозтоваропроизводителям сектора молочного животноводства стали доступны инновации, предлагаемые на мировом рынке. На крупных вводимых объектах в молочном скотоводстве в большинстве регионов применяются современные автоматизированные системы с использованием доильных роботов.

Одним из элементов доильного робота, влияющим на эффективность процесса доения, является манипулятор, который выполняет подготовительно-заключительные операции и осуществляет контроль над процессом доения. Его применение в доильном роботе дает ряд преимуществ, которые можно разделить на:

– технологические: точное позиционирование доильных стаканов относительно сосков коровы (снижает риск травм) и автоматическое выполнение операций (очистка сосков, массаж вымени для стимуляции молокоотдачи, подключение доильных стаканов, контроль процесса доения и снятие стаканов после завершения), что исключает необходимость ручного труда и минимизирует человеческий фактор, который может привести к ошибкам; дифференцированное управление доением по каждой доле вымени отдельно, что особенно важно при неравномерном развитии долей вымени; возможность оснащения датчиками для измерения параметров молока (электропроводность, температура, кислотность), что позволяет своевременно выявлять признаки мастита и других заболеваний;

– физиологические: контроль и управление по долям вымени;

– экономические: сокращается потребность в ручном труде, что снижает затраты на оплату труда; повышение надоев; снижение затрат на лечение; повышение качества молока; увеличение обслуживаемого поголовья [2], [3], [4].

В России исследования и разработки в области систем технического зрения для доильных роботов находятся на стыке академической науки, прикладной робототехники и реального сектора сельского хозяйства. Специализированных научных групп, которые занимались бы исключительно локализацией вымени или сосков (как узкой темой), крайне мало: среди производителей — компания «Промтехника-Приволжье», университетских и научных школ — Университет Иннополис (Республика Татарстан), ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (выполняет роль главного государственного научного центра компетенций по механизации животноводства). Специализация в контексте локализации для доильных роботов у каждого в этих группах имеет узконаправленный характер:

- ФГБНУ ФНАЦ ВИМ: разработка отечественной кинематики манипуляторов, алгоритмов дифференцированного управления доильными стаканами и интеграция систем технического зрения с исполнительными механизмами [5];

- компания «Промтехника-Приволжье»: прикладная реализация: интеграция систем технического зрения, распознавание животных и точное позиционирование манипулятора («руки» робота) для надевания доильных стаканов на соски [6];

- Университет Иннополис: разработка алгоритмов автономного движения мобильных платформ, SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) и сенсоров для работы в неструктурированной среде коровника без использования GPS [7];

- ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева: отраслевая экспертиза (адаптация технологий машинного зрения под биологические особенности крупного рогатого скота и технологические процессы молочных ферм) [8];

- МГТУ им. Н.Э. Баумана: фундаментальные исследования стереозрения, навигации в условиях плохой освещенности и отсутствия спутниковых сигналов; адаптация методов высокоточной подводной робототехники для наземных агророботов [9].

Точность позиционирования доильных стаканов обеспечивает преимущества применения манипулятора в доильном роботе и зависит от применяемой технологии локализации (систем технического зрения). Данное направление исследований является чаще всего частью комплексных проектов по созданию отечественных агророботов. Поэтому анализ и обобщение актуальной информации исключительно о существующих системах технического зрения, применяемых конкретно в доильных роботах, представляет собой оригинальный материал в данной области.

Целью исследования является анализ технических особенностей современных систем локализации руки манипулятора, используемых в доильных роботах.

Аналитическое исследование проводили на базе отдела научно-информационного обеспечения инновационного развития АПК ФГБНУ «Росинформагротех» в рамках выполнения НИР выполняемой по Государственному заданию Минсельхоза России № 082-00120-26-00 от 23.01.2026 (тема 1.2-26). Отбор, систематизация и анализ источников научно-технической информации (НТИ) проводили по открытым ресурсам (интернет-источники, электронные библиотеки) с использованием методов сравнительного анализа, экспертных оценок, опыта применения интеллектуальных технологий в хозяйствах.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Результат и обсуждение

Локализация руки робота (манипулятора) у разных производителей реализуется с использованием различных технологий, которые обеспечивают определение положения сосков для подсоединения доильных стаканов (таблица 1). В настоящее время в современных доильных роботах используют технологии трёхуровневого лазерного сканирования (TDS), с использованием 3D-камер ToF (Time-of-Flight), ультразвуковых и оптических датчиков, фототехнологии.

Таблица 1 - Технологии определения местоположения сосков вымени коров в установках роботизированного доения

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.5.1

Компания	Технология локализации	Достоинства	Недостатки
Lely	Трёхуровневое сканирование (TDS) с лазерами	Высокая точность локализации сосков. Быстрое обнаружение сосков. Минимизация движений манипулятора.	Высокая стоимость оборудования. Ограниченная коррекция в реальном времени. Требовательность к техническому обслуживанию.
GEA	3D-скани-рование с использованием ToF камеры	Работа в условиях низкой освещённости. Быстрое получение 3D-данных. Высокая скорость сканирования. Относительно невысокая стоимость. Компактность. Автоматическое определение расстояния.	Ограниченная точность на малых расстояниях. Низкая точность для тёмных поверхностей. Чувствительность к внешним условиям (прямые солнечные лучи, туман, пар или пыль в помещении). Ограниченное разрешение и угол обзора. Проблемы с распознаванием нестандартных случаев (наличие пятого (добавочного) соска; очень сближенные соски; аномальное расположение сосков или форма вымени; набухшее вымя, когда соски торчат вбок). Влияние загрязнений и физиологических особенностей (навоз, подстилка или длинные волосы на вымени мешают точному сканированию; наросты или воспаления на коже искажают данные). Ограниченный рабочий диапазон (минимальное расстояние для сканирования — около 0,3м, максимальное — до 6–10м.
De Laval			
Bou-matic Robo-tics	Фототехнология	Высокая разрешающая способность. Возможность комплексной оценки	Зависимость от освещения. Чувствительность к загрязнениям.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Компания	Технология локализации	Достоинства	Недостатки
		(может одновременно оценивать расстояние между сосками; угол наклона сосков; вертикальное и горизонтальное положение кончиков сосков; физиологические особенности вымени). Гибкость настройки. Мультифункциональность (камеры могут использоваться не только для локализации сосков, но и для идентификации коровы (по меткам или биометрии); контроля поведения животного; мониторинга здоровья вымени (визуальные признаки мастита). Относительно низкая стоимость. Возможность записи и архивирования. Быстрое обновление данных	Проблемы с нестандартной анатомией. Ограниченная точность на расстоянии. Потребность в значительных вычислительных ресурсах. Зависимость от угла обзора. Необходимость регулярной калибровки. Уязвимость к внешним помехам. Ограниченная работа в условиях движения
Full-wood	Ультразвуковые датчики	Нечувствительность к освещённости. Устойчивость к загрязнениям. Измерение расстояния. Относительно невысокая стоимость. Простота интеграции.	Ограниченная точность (погрешность 1–3 см). Низкая разрешающая способность. Искажение сигнала при движении животного. Ограниченный диапазон установочных расстояний. Влияние свойств среды (температура воздуха (меняет скорость распространения ультразвука), влажность (поглощает часть сигнала), сквозняки и воздушные потоки (искажают траекторию сигнала). Проблемы с нестандартной анатомией. Необходимость регулярной калибровки. Ограниченное поле зрения требует установку нескольких датчиков либо механическое перемещение одного датчика, что усложняет систему. Помехи от соседних

 © Авторы статьи / Authors of the article

Компания	Технология локализации	Достоинства	Недостатки
			объектов (металлических частей робота или других элементов). Медленная скорость сканирования
	Оптические датчики	Высокое разрешение и детализация. Комплексный анализ параметров. Высокая скорость сканирования (до 5 кадров /сек). Возможность 3D-моделирования. Интеграция с ИИ и машинным обучением. Мультифункциональность Возможность записывать и архивировать данные. Относительно невысокая стоимость. Неинвазивность	Зависимость от уровня освещённости в коровнике. Чувствительность к загрязнениям. Необходимость выбирать верный ракурс и рекомендуемый угол установки во избежание возникновения проблем с перекрытием объектов. Ограниченная точность при удалении камеры. Сложность обработки данных. Необходимость регулярной калибровки. Уязвимость к внешним помехам (прямые солнечные лучи, блики, туман или пар в помещении). Искажение изображения при движении животного. Потребность в дополнительных датчиках для повышения точности, что усложняет конструкцию и увеличивает стоимость системы. Погрешность измерений (при оптимальных условиях измерения расстояния до кончика соска может составлять от 0,004 до 0,007м по оси Z, а боковое расстояние между рядами сосков может иметь ошибку до 12,7%).

Примечание: составлено на основании [10], [11], [13], [14]

Трёхуровневое лазерное сканирование (TDS) включает в себя ряд последовательных этапов [15]:

- предварительное определение местоположение крестца коровы, в результате чего манипулятор может скорректировать своё начальное положение;
- определение местоположения вымени с помощью лазерного модуля, установленного в «руке» манипулятора. Сканирование области вымени даёт общее представление о его расположении и ориентации;
- трёхуровневое лазерное детальное сканирование каждого соска с помощью трех лазерных лучей: лазерные лучи проецируются на соски, отражаются, и их отражение улавливается датчиками. На основе этих данных система строит точную трёхмерную модель расположения сосков относительно нулевой точки;

 © Авторы статьи / Authors of the article

- корректировка положения манипулятора: после сканирования система анализирует полученные данные и корректирует положение манипулятора для точного наведения доильных стаканов на соски.

В результате надевание доильных стаканов производится в оптимальной последовательности с сокращенным временем операции без дискомфорта для коровы.

Эффективность данного высокотехнологичного решения зависит от правильной подготовки коров, регулярного технического обслуживания и соответствия анатомии вымени стандартным параметрам.

3D сканирование с использованием ToF-камеры сочетает относительно невысокую стоимость, компактность и возможность работы в условиях низкой освещённости [16].

Принцип работы ToF-камеры (Time-of-Flight, «время полёта») основан на измерении расстояния до объекта, фиксации времени, за которое световой импульс от встроенного излучателя достигает поверхности и возвращается обратно.

Камера излучает короткие импульсы инфракрасного света, который отражается от вымени и сосков коровы. Сенсор камеры улавливает вернувшийся свет. Электроника измеряет время между излучением и приёмом сигнала. На основе данных о времени полёта для каждого пикселя формируется «облако точек» (Point Cloud), представляющее собой трёхмерную модель объекта с координатами X, Y, Z относительно камеры. Алгоритмы обработки изображений идентифицируют соски и определяют их точное положение в пространстве.

Типовой алгоритм работы блока сканирования складывается из набора действий: обнаружение коровы — первичное сканирование вымени — детальное сканирование сосков — корректировка позиции манипулятора — мониторинг во время доения. Их последовательность определяется местом расположения камеры:

1. Lely Astronaut A4: ToF-камера установлена в верхней части робота и определяет положение крестца коровы. Затем лазерный модуль в «руке» манипулятора уточняет положение вымени.

2. DeLaval VMS: камера встроена непосредственно в манипулятор и определяет местоположение вымени и сосков относительно него.

3. GEA MIone: ToF-камера расположена в «руке» манипулятора без дополнительных лазерных излучателей. Она защищена корпусом и выполняет все этапы сканирования самостоятельно.

Следует отметить, что точность данной технологии невысока, особенно на малых расстояниях и при наличии загрязнений или нестандартных анатомических особенностях вымени.

Фототехнологии — это решение, обеспечивающее хорошую разрешающую способность и возможностью интеграции с ИИ. Они позволяют не только точно определять положение сосков, но и выполнять дополнительные задачи по мониторингу состояния животных [17].

В основе фототехнологий лежит использование одной или нескольких видеокамер (монохромных, цветных, стереоскопических или 3D ToF), источников освещения (встроенный ИК-подсвет или внешний источник света) и процессор с ПО с алгоритмами компьютерного зрения для анализа изображения вымени коровы и определения положения сосков.

Поэтапный процесс работы включает в себя обнаружение коровы и позиционирование (камера фиксирует появление коровы в стойле; система определяет опорные точки (крестец, ноги, вымя) и оценивает положение коровы относительно манипулятора; при необходимости робот корректирует положение животного (например, с помощью кормушки или направляющих); предварительную обработку изображения (съёмка области вымени с нескольких ракурсов (если используется стереоскопическая система), улучшение качества изображения: коррекция яркости/контраста, шумоподавление, выравнивание освещённости, сегментация изображения — выделение области вымени на фоне других объектов); распознавание сосков (алгоритмы обнаружения границ и контуров выделяют формы, похожие на соски; классификаторы (на основе нейронных сетей или традиционных методов) определяют, какие объекты являются сосками, а какие — нет; для каждой обнаруженной точки определяются координаты (X,Y) в плоскости изображения); трёхмерную реконструкцию с использованием 3D-камера или стереосистемы (сопоставление данных с нескольких камер или кадров; расчёт глубины (координаты Z) для каждой точки; построение 3D-модели вымени и точное определение положения кончиков сосков в пространстве); передачу данных в систему управления (координаты сосков передаются в контроллер манипулятора; манипулятор позиционирует доильные стаканы с учётом текущих координат и траектории движения); мониторинг процесса доения (камеры могут продолжать наблюдение за положением стаканов; при смещении стакана система корректирует его положение или подаёт сигнал оператору); заключительные операции (после снятия стаканов камера может проверить состояние сосков и вымени (наличие крови, отёков и т. п.); данные сохраняются для последующего анализа и обучения системы).

Эффективность фототехнологий зависит от условий эксплуатации: освещения, чистоты вымени, анатомических особенностей коровы и стабильности её положения во время сканирования. Для достижения максимальной точности производители часто сочетают их другими методами определения положения сосков.

Применение ультразвуковых датчиков является надёжным и экономичным решением. Они устойчивы к сложным микроклиматическим условиям животноводческого помещения и безопасны для животных [18]. В зависимости от условий применения датчики могут работать в режимах многообъектного обнаружения, одиночного импульса или непрерывном (таблица 2).

 © Авторы статьи / Authors of the article

Таблица 2 - Условия применения и описание режимов работы ультразвуковых датчиков

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.5.2

Режим работы	Описание	Условия применения
Непрерывный	– импульсы излучаются циклически	– для отслеживания движения коровы и корректировки положения манипулятора в реальном времени
Одиночного импульса	– датчик посылает один импульс, считывает данные и ждёт следующей команды	– для быстрого определения положения перед началом доения
Многообъектного обнаружения	– некоторые датчики могут одновременно фиксировать несколько отражений	– для сканирования всех четырёх сосков

Однако их точность ограничена, а разрешающая способность недостаточна для работы с нестандартными анатомическими особенностями вымени.

В основе их работы лежит эффект эхолокации (они излучают ультразвуковые волны, которые отражаются от объекта (вымени и сосков коровы), а затем улавливают отражённый сигнал. На основе времени прохождения сигнала вычисляется расстояние до объекта), который реализуется с помощью передатчика (генерирует ультразвуковые импульсы с частотой от десятков до сотен кГц), приёмника (улавливает отражённые волны). Обработка сигнала и расчёт расстояния производится микроконтроллером, а передача данных в систему управления манипулятором – интерфейсом связи.

Процесс работы системы локализации манипулятора на основе ультразвуковых датчиков складывается из нескольких этапов:

- датчик начинает циклически излучать ультразвуковые импульсы через равные промежутки времени в направлении вымени коровы;
- ультразвуковая волна сталкивается с поверхностью вымени или соска и отражается обратно. Приёмник фиксирует отражённый сигнал;
- микроконтроллер измеряет время между излучением и приёмом сигнала и по формуле рассчитывает расстояние до вымени;
- несколько датчиков (или один датчик, который перемещается манипулятором для сканирования с разных углов) сканируют область вымени. Система сопоставляет данные о расстояниях с разных точек и определяет координаты сосков в пространстве (X, Y, Z);
- рассчитанные координаты сосков передаются в контроллер манипулятора. Манипулятор размещает доильные стаканы с учётом текущих координат;
- датчики могут продолжать сканирование в реальном времени, корректируя положение манипулятора в соответствии с траекторией движения коровы, что препятствует соскальзыванию стаканов;
- после снятия стаканов датчик(-ки) может проверить положение сосков для контроля завершения процесса.

Оптические датчики, используемые в системах локализации сосков вымени, обладают высокой разрешающей способностью и возможностью интеграции с системами искусственного интеллекта. Они позволяют не только точно определять положение сосков, но и выполнять дополнительные задачи по мониторингу состояния животных [19]

В доильных роботах с целью локализации манипулятора находят применение несколько типов датчиков. Это — 2D-камеры (монохромные или цветные) — для фиксации изображения и распознавания образов; 3D-камеры (в т. ч. ToF-камеры — Time-of-Flight) — для построения трёхмерной модели вымени; лазерные сканеры — для точного позиционирования манипулятора.

Работа оптических датчиков основана на регистрации и анализе светового излучения, отражённого от объекта (вымени, сосков, молока), основанном на поэтапном выполнении операций (таблица 3).

Таблица 3 - Этапы работы системы локализации с оптическими датчиками

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.5.3

Этап работы	Операции
Освещение объекта	– встроенный источник света (ИК-подсветка, лазер, видимый свет) освещает область вымени; – в ToF-камерах излучаются короткие импульсы ИК-света.
Приём отражённого излучения	– объектив фокусирует отражённый свет на сенсор (матрицу); – сенсор преобразует световые сигналы в электрические.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Этап работы	Операции
Преобразование сигнала	– аналого-цифровой преобразователь (АЦП) переводит аналоговый сигнал в цифровой формат; – данные поступают в процессор для обработки.
Обработка изображения	– алгоритмы компьютерного зрения выделяют область вымени на фоне других объектов; – система распознаёт соски по форме, цвету, контрасту; – при использовании 3D-камер или стереосистем рассчитывается глубина (координата Z).
Построение модели и передача данных	– формируется карта глубины (для ToF) или облако точек (Point Cloud); – определяются координаты сосков (X, Y, Z) относительно манипулятора; – данные передаются в систему управления роботом.
Позиционирование манипулятора	– контроллер манипулятора рассчитывает траекторию движения; – доильные стаканы надеваются на соски с учётом текущего положения.
Мониторинг процесса	– камеры могут продолжать наблюдение за положением стаканов; – при смещении система корректирует положение или подаёт сигнал оператору.

Эффективность оптических датчиков сильно зависит от условий эксплуатации: освещения, чистоты вымени, анатомических особенностей коровы и стабильности её положения во время сканирования.

В созданном в России доильном роботе «Волшебник» определение положения сосков вымени коровы осуществляется с помощью триангуляционного лазерного сканера или 3D-камеры. Система строит 3D-модель вымени и определяет точные координаты сосков в пространстве. Алгоритм учитывает форму вымени, длину сосков и их расположение. Расширенная область для поиска вымени и подключения доильных стаканов позволяет работать с разными формами вымени, что снижает процент выбраковки животных из-за проблем с подключением [20]

Существующие технологии локализации манипулятора доильных роботов сталкиваются с рядом фундаментальных проблем: непредсказуемое поведение животного, оптические помехи (пар, брызги молока), отсутствие GPS-сигнала внутри помещений и высокая вычислительная нагрузка. Для их решения необходим комплексный подход, который включал в себя аппаратные инновации и новые алгоритмы искусственного интеллекта, а именно:

– гибридный подход, суть которого состоит в дополнении одной технологии другой (для максимальной точности дополнение оптических датчиков ультразвуковыми, лазерными сканерами и ToF-камерами; для повышения разрешения и точности комбинация ToF-камер с RGBD-камерами; для точечного сканирования сочетание ToF-камер с лазерными сканерами; для улучшения алгоритмов распознавания дополнение ToF-камер системами искусственного интеллекта);

– использование предиктивных моделей поведения животного (внедрение рекуррентных нейронных сетей (LSTM, Transformer-based models), алгоритм которых анализирует видеопоследовательность за последние 1–2 секунды, строит траекторию движения каждой конечности и туловища животного, экстраполируя (предсказывая), где окажется сосок в момент касания манипулятором через 300–500 миллисекунд. Это компенсирует задержки вычислений и механики);

– интеграция жестких биомеханических ограничений в архитектуру искусственного интеллекта (алгоритм находит наиболее визуально стабильные анатомические элементы (тазобедренные суставы и хвостовую часть животного), математически отсекает зоны невозможного расположения вымени, сужая поиск до строго заданного эллипсоида под брюхом коровы, что повышает точность и скорость работы системы);

– интеграция жестких биомеханических ограничений в архитектуру искусственного интеллекта (проецирование невидимой для глаза сетки точек на вымя, искажение которой дает сигнал к построению высокоточной 3D-модель поверхности без необходимости использования мощных прожекторов; использование поляризационных фильтров для подавления главных источников шума для классических алгоритмов сегментации (зеркальных бликов от влажной кожи и капель молока);

– переход от централизованной локализации к децентрализованной, в которой система технического зрения будет одновременно вести отслеживание четырех независимых объектов (каждого соска), для чего манипулятор оснащается независимыми микро-актуаторами для каждого доильного стакана. При смещении соска стакан корректирует свою позицию автономно без пересчета всей кинематики руки;

– интеграция систем машинного зрения с датчиками IoT (болюсы, ошейники). Если RFID-метка идентифицировала корову как тревожную или находящуюся в определенной фазе лактации, алгоритм заранее меняет

 © Авторы статьи / Authors of the article

параметры локализации: увеличивает безопасную дистанцию подхода и снижает скорость выдвижения манипулятора, предотвращая удары, которые заставляют животное двигаться еще сильнее.

Несмотря на преодоление недостатков существующих систем локализации руки манипулятора, остается нерешенной проблема соответствия нормативным значениям продолжительности подготовительных операций (обработка сосков и подключение доильных стаканов). В ряде источников [21] отмечается, что продолжительность подготовительных операций в среднем превышает нормативное значение: обработка сосков и подключение доильных стаканов составляет от 1,38 до 2,76 мин., сдаивание первых струек молока, очистка сосков вымени — в пределах 0,78…1,20 мин., надевание доильных стаканов — 0,50…1,56 мин. (меньшие значения принадлежат доильному роботу Lely, а большие роботу DeLaval). Данные значения не соответствуют требованиям, сформулированным в правилах машинного доения: продолжительность надевания доильных стаканов не должна превышать 60 сек. после начала санитарной обработки сосков вымени оператором доения. Наступление активной фазы рефлекса молокоотдачи и запаздывание с подключением доильных стаканов влечет за собой не полное выдаивание вымени коровы, что подтверждается многочисленными исследованиями как российских, так и зарубежных ученых [22], [23], [24].

Заключение

Анализ информационных источников показал, что для компенсации недостатков, имеющихся у каждой технологии локализации, производители используют гибридный подход, суть которого состоит в дополнении одной технологии другой:

1. Максимальная точность достигается за счет дополнения оптических датчиков ультразвуковыми, лазерными сканерами и ToF-камерами.
2. Для повышения разрешения и точности ToF-камеры комбинируют с RGBD-камерами.
3. Для точечного сканирования ToF-камеры комбинируют с лазерными сканерами.
4. Для улучшения алгоритмов распознавания ToF-камеры комбинируют с системами искусственного интеллекта.

Наряду с этим для решения существующих проблем необходим комплексный подход, который должен включать в себя не только сочетание технологий локализации, но и использование предиктивных моделей поведения животного, интеграцию жестких биомеханических ограничений в архитектуру искусственного интеллекта, а также переход от централизованной локализации к децентрализованной.

Проведенный анализ показал, что использование гибридного подхода в технологиях локализации руки манипулятора доильного робота не решает проблему соответствия продолжительности подготовительных операций доения нормативному значению (не более 60 сек.). В этой связи возникает необходимость дополнительного изучения вопроса влияния технологий локализации руки манипулятора на продолжительность подготовительных операций доения.

Дальнейшее совершенствование технологий локализации руки манипулятора доильного робота должно идти в направлении повышения точности, степени разрешения, разработки более совершенного алгоритма управления, сокращающего продолжительность предварительных операций.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Трифанов А.В., Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Санкт-Петербург Российская Федерация
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.5.4

Conflict of Interest

None declared.

Review

Trifanov A.V., Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint-Petersburg Russian Federation
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.5.4

Список литературы / References

1. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года : Указ Президента РФ № 309 от 07.05.2024. — URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542 (дата обращения: 17.06.2026).

2. Скворцова Е.Г. Влияние роботизированного доения коров на эффективность производства молока / Е.Г. Скворцова, О.В. Чепуштанова // Аграрный вестник Урала. — 2022. — № 1(216). — С. 66–75. — DOI: 10.32417/1997-4868-2022-216-01-66-75.

3. Обзор рынка роботизированных систем доения (RMS) // Market Research Intellect. — 2026. — URL: https://www.marketresearchintellect.com/product/global-robotic-milking-systems-rms-market/ (дата обращения: 27.03.2026).

4. Как автоматизация трансформирует мировое молочное производство // Dairynews.today. — 2025. — URL: https://dairynews.today/kz/news/the-rise-of-the-milking-machine-automation-takes-root-in-global-dairy.html (дата обращения: 27.03.2026).

5. Цифровые интеллектуальные технологии, роботизированные системы и комплексы машин в животноводстве. — 2018. — URL: https://vim.ru/science/scientific-directions/181 (дата обращения: 04.09.2026).

6. «Промтехника–Приволжье» на страже продовольственной безопасности // Мир робототехники. — 2023. — URL: https://roboticsworld.ru/cases/promtekhnika-privolzhe-na-strazhe-prodovolstvennoy-bezopasnosti/ (дата обращения: 04.09.2026).

7. Центр компетенций НТИ по направлению «Технологии компонентов робототехники и мехатроники» // Национальная технологическая инициатива. — 2023. — URL: https://nti2035.ru/technology/competence_centers/innopolis.php (дата обращения: 04.09.2026).

 © Авторы статьи / Authors of the article

8. Фундаментальные и прикладные научные исследования // Наука и инновации в Российском государственном аграрном университете им. К.А. Тимирязева. — 2025. — URL: https://www.thebullvine.com/news/robotic-milking-revolution-15-surge-in-delaval-systems-as-labor-crisis-deepens/ (дата обращения: 04.09.2026).

9. Научно-исследовательская часть. Научные лаборатории // Научно-учебный комплекс «Фундаментальные науки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2026. — URL: https://fn.bmstu.ru/research-section-sec-fs/research-fs (дата обращения: 04.09.2026).

10. Кирсанов В.В. Сравнительный анализ и подбор систем технического зрения в молочном животноводстве / В.В. Кирсанов, С.С. Юрочка, Д.Ю. Павкин [и др.] // Вестник НГИЭИ. — 2019. — № 1(92). — С. 69–79.

11. Система роботизированного доения // Lely astronaut. — 38 с.

12. Беляева Н.В. Принципы работы роботизированной системы доения коров в СПК «Глинский» / Н.В. Беляева // Вестник биотехнологии. — 2016. — № 1(7). — С. 2–10.

13. Robotic Milking Revolution: 15% Surge in DeLaval Systems as Labor Crisis Deepens // The Bullvine. — 2025. — URL: https://www.thebullvine.com/news/robotic-milking-revolution-15-surge-in-delaval-systems-as-labor-crisis-deepens/ (accessed: 27.03.2026).

14. Карпович С.К. Системы позиционирования доильного оборудования на вымени коров при роботизированной технологии доения / С.К. Карпович, Е.Л. Жилич, В.Н. Еднач [и др.] // Современные тенденции развития сельскохозяйственного машиностроения, оснащения и технического сервиса в АПК. — Минск : Белорусский государственный аграрный технический университет, 2023. — С. 58–62.

15. Кирсанов В.В. Методика получения и обработки фото- и видеоматериала для автоматической бонитировки молочных коров / В.В. Кирсанов, С.С. Юрочка, Д.Ю. Павкин [и др.] // Вестник ВНИИМЖ. — 2019. — № 1(33). — С. 142–146.

16. Керимов М.А. Исследование системы машинного зрения роботизированной установки преддоильной подготовки вымени и повышение её точности / М.А. Керимов, Н.В. Муханов, Д.В. Барабанов // АгроЭкоИнженерия. — СПб. : Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 2024. — С. 118–135.

17. Кирсанов В.В. Концепция, модели и схемы дифференцированного управления в роботизированном манипуляторе доения / В.В. Кирсанов, Д.Ю. Павкин, Д.В. Шилин [и др.] // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. — 2021. — № 1(22). — С. 128–135. — DOI: 10.30766/2072-9081.2021.22.1.128-135.

18. Павкин Д.Ю. Исследование типов строения сосков и их расположение на вымени коров для формирования цифрового массива изображений / Д.Ю. Павкин, А.Р. Хакимов, И.М. Довлатов [и др.] // Вестник НГИЭИ. — 2023. — № 11(150). — С. 42–52.

19. Павкин Д.Ю. Разработка способа применения оптического модуля для определения биометрических параметров вымени / Д.Ю. Павкин, С.С. Юрочка // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. — Киров : Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, 2023. — С. 306–316.

20. Роботизация в молочном животноводстве УДР «ВОЛШЕБНИК» // Презентация ГК AGROHOME. — 2024. — URL: https://mb38.ru/upload/2024/cksh.pdf (дата обращения: 29.05.2026).

21. Тяпугин Е.А. Особенности роботизированной технологии доения высокопродуктивных коров на современных комплексах / Е.А. Тяпугин, С.Е. Тяпугин, В.К. Углин [и др.] // Достижения науки и техники АПК. — 2015. — № 2(29). — С. 57–58.

22. Wildridge A.M. Transitioning from conventional to automatic milking: Effects on the human-animal relationship / A.M. Wildridge, P.C. Thomson, S.C. Garcia [et al.] // Journal of Dairy Science. — 2020. — Vol. 103, No. 2. — P. 1608–1619. — DOI: 10.3168/jds.2019-16658.

23. Besier J. Technical note: Effects of attachment of hind teats before cleaning and attachment of front teats on milking characteristics in automatic milking systems / J. Besier, G. Schupbach-Regula, O. Wellnitz [et al.] // Journal of Dairy Science. — 2017. — Vol. 100, No. 4. — P. 3091–3095. — DOI: 10.3168/jds.2016-11712.

24. Negrao J.A. Milk yield, residual milk, oxytocin and cortisol release during machine milking in Gir, Gir x Holstein and Holstein cows / J.A. Negrao, P.G. Marnet // Reproduction Nutrition Development. — 2006. — Vol. 46, No. 1. — P. 77–85. — DOI: 10.1051/rnd:2005068.

Список литературы на английском языке / References in English

1. O natsional'nykh tselyakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda i na perspektivu do 2036 goda [On the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030 and for the future up to 2036] : Decree of the President of the Russian Federation No. 309 of 07.05.2024. — URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542 (accessed: 17.06.2026). [in Russian]

2. Skvortsova E.G. Vliyaniye robotizirovannogo doyeniya korov na effektivnost' proizvodstva moloka [The impact of robotic cow milking on the efficiency of milk production] / E.G. Skvortsova, O.V. Chepushtanova // Agrarian Bulletin of the Urals. — 2022. — No. 1(216). — P. 66–75. — DOI: 10.32417/1997-4868-2022-216-01-66-75. [in Russian]

3. Obzor rynka robotizirovannykh sistem doyeniya (RMS) [Robotic Milking Systems (RMS) market overview] // Market Research Intellect. — 2026. — URL: https://www.marketresearchintellect.com/product/global-robotic-milking-systems-rms-market/ (accessed: 27.03.2026). [in Russian]

4. Kak avtomatizatsiya transformiruyet mirovoye molochnoye proizvodstvo [How automation is transforming global dairy production] // Dairynews.today. — 2025. — URL: https://dairynews.today/kz/news/the-rise-of-the-milking-machine-automation-takes-root-in-global-dairy.html (accessed: 27.03.2026). [in Russian]

 © Авторы статьи / Authors of the article

5. Tsifrovyye intellektual'nyye tekhnologii, robotizirovannyye sistemy i kompleksy mashin v zhivotnovodstve [Digital intelligent technologies, robotic systems and machine complexes in animal husbandry]. — 2018. — URL: https://vim.ru/science/scientific-directions/181 (accessed: 04.09.2026). [in Russian]

6. "Promtekhnika–Privolzhye" na strazhe prodovol'stvennoy bezopasnosti ["Promtekhnika–Privolzhye" guarding food security] // Mir robototekhniki [World of Robotics]. — 2023. — URL: https://roboticsworld.ru/cases/promtekhnika-privolzhe-na-strazhe-prodovolstvennoy-bezopasnosti/ (accessed: 04.09.2026). [in Russian]

7. Tsentr kompetentsiy NTI po napravleniyu "Tekhnologii komponentov robototekhniki i mekhatroniki" [NTI Competence Center in the field of "Technologies of Robotics and Mechatronics Components"] // Natsional'naya tekhnologicheskaya initsiativa [National Technology Initiative]. — 2023. — URL: https://nti2035.ru/technology/competence_centers/innopolis.php (accessed: 04.09.2026). [in Russian]

8. Fundamental'nyye i prikladnyye nauchnyye issledovaniya [Fundamental and applied scientific research] // Nauka i innovatsii v Rossiyskom gosudarstvennom agrarnom universitete im. K.A. Timiryazeva [Science and innovations at the Russian State Agrarian University named after K.A. Timiryazev]. — 2025. — URL: https://www.thebullvine.com/news/robotic-milking-revolution-15-surge-in-delaval-systems-as-labor-crisis-deepens/ (accessed: 04.09.2026). [in Russian]

9. Nauchno-issledovatel'skaya chast'. Nauchnyye laboratorii [Research unit. Scientific laboratories] // Nauchno-uchebnyy kompleks "Fundamental'nyye nauki" MGTU im. N.E. Baumana [Scientific and Educational Complex "Fundamental Sciences" of Bauman Moscow State Technical University]. — 2026. — URL: https://fn.bmstu.ru/research-section-sec-fs/research-fs (accessed: 04.09.2026). [in Russian]

10. Kirsanov V.V. Sravnitel'nyy analiz i podbor sistem tekhnicheskogo zreniya v molochnom zhivotnovodstve [Comparative analysis and selection of computer vision systems in dairy farming] / V.V. Kirsanov, S.S. Yurochka, D.Yu. Pavkin [et al.] // Vestnik NGIEI [Bulletin of NGIEI]. — 2019. — No. 1(92). — P. 69–79. [in Russian]

11. Sistema robotizirovannogo doyeniya [Robotic milking system] // Lely company brochure. — 38 p. [in Russian]

12. Belyaeva N.V. Printsipy raboty robotizirovannoy sistemy doyeniya korov v SPK "Glinskiy" [Principles of operation of the robotic cow milking system at the Glinsky agricultural production cooperative] / N.V. Belyaeva // Vestnik biotekhnologii [Bulletin of Biotechnology]. — 2016. — No. 1(7). — P. 2–10. [in Russian]

13. Robotic Milking Revolution: 15% Surge in DeLaval Systems as Labor Crisis Deepens // The Bullvine. — 2025. — URL: https://www.thebullvine.com/news/robotic-milking-revolution-15-surge-in-delaval-systems-as-labor-crisis-deepens/ (accessed: 27.03.2026).

14. Karpovich S.K. Sistemy pozitsionirovaniya doil'nogo oborudovaniya na vymeni korov pri robotizirovannoy tekhnologii doyeniya [Systems for positioning milking equipment on cow udders in robotic milking technology] / S.K. Karpovich, E.L. Zhilich, V.N. Ednach [et al.] // Sovremennyye tendentsii razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroyeniya, osnashcheniya i tekhnicheskogo servisa v APK [Current trends in the development of agricultural engineering, equipment and technical service in the agro-industrial complex]. — Minsk : Belarusian State Agrarian Technical University, 2023. — P. 58–62. [in Russian]

15. Kirsanov V.V. Metodika polucheniya i obrabotki foto- i videomateriala dlya avtomaticheskoy bonitirovki molochnykh korov [Methodology for obtaining and processing photo and video material for automatic grading of dairy cows] / V.V. Kirsanov, S.S. Yurochka, D.Yu. Pavkin [et al.] // Vestnik VNIIMZH [Bulletin of VNIIMZH]. — 2019. — No. 1(33). — P. 142–146. [in Russian]

16. Kerimov M.A. Issledovaniye sistemy mashinnogo zreniya robotizirovannoy ustanovki preddoil'noy podgotovki vymeni i povysheniye yeyo tochnosti [Study of the machine vision system of a robotic pre-milking udder preparation unit and improvement of its accuracy] / M.A. Kerimov, N.V. Mukhanov, D.V. Barabanov // AgroEkoInzheneriya [AgroEcoEngineering]. — St. Petersburg : Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 2024. — P. 118–135. [in Russian]

17. Kirsanov V.V. Kontseptsiya, modeli i skhemy differentsirovannogo upravleniya v robotizirovannom manipulyatore doyeniya [Concept, models and schemes of differentiated control in a robotic milking manipulator] / V.V. Kirsanov, D.Yu. Pavkin, D.V. Shilin [et al.] // Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka [Agricultural Science Euro-North-East]. — 2021. — No. 1(22). — P. 128–135. — DOI: 10.30766/2072-9081.2021.22.1.128-135. [in Russian]

18. Pavkin D.Yu. Issledovaniye tipov stroyeniya soskov i ikh raspolozheniye na vymeni korov dlya formirovaniya tsifrovogo massiva izobrazheniy [Study of the types of teat structure and their location on cow udders for forming a digital image array] / D.Yu. Pavkin, A.R. Khakimov, I.M. Dovlatov [et al.] // Vestnik NGIEI [Bulletin of NGIEI]. — 2023. — No. 11(150). — P. 42–52. [in Russian]

19. Pavkin D.Yu. Razrabotka sposoba primeneniya opticheskogo modulya dlya opredeleniya biometricheskikh parametrov vymeni [Development of a method for using an optical module to determine biometric parameters of the udder] / D.Yu. Pavkin, S.S. Yurochka // Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka [Agricultural Science Euro-North-East]. — Kirov : Federal Agricultural Research Center of the North-East named after N.V. Rudnitsky, 2023. — P. 306–316. [in Russian]

20. Robotizatsiya v molochnom zhivotnovodstve UDR "VOLSHEBNIK" [Robotization in dairy farming UDR "VOLSHEBNIK"] // Presentation of the AGROHOME Group of Companies. — 2024. — URL: https://mb38.ru/upload/2024/cksh.pdf (accessed: 29.05.2026). [in Russian]

21. Tyapugin E.A. Osobennosti robotizirovannoy tekhnologii doyeniya vysokoproduktivnykh korov na sovremennykh kompleksakh [Features of robotic milking technology for highly productive cows at modern complexes] / E.A. Tyapugin, S.E. Tyapugin, V.K. Uglin [et al.] // Dostizheniya nauki i tekhniki APK [Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex]. — 2015. — No. 2(29). — P. 57–58. [in Russian]

22. Wildridge A.M. Transitioning from conventional to automatic milking: Effects on the human-animal relationship / A.M. Wildridge, P.C. Thomson, S.C. Garcia [et al.] // Journal of Dairy Science. — 2020. — Vol. 103, No. 2. — P. 1608–1619. — DOI: 10.3168/jds.2019-16658.

 © Авторы статьи / Authors of the article

23. Besier J. Technical note: Effects of attachment of hind teats before cleaning and attachment of front teats on milking characteristics in automatic milking systems / J. Besier, G. Schupbach-Regula, O. Wellnitz [et al.] // Journal of Dairy Science. — 2017. — Vol. 100, No. 4. — P. 3091–3095. — DOI: 10.3168/jds.2016-11712.

24. Negrao J.A. Milk yield, residual milk, oxytocin and cortisol release during machine milking in Gir, Gir x Holstein and Holstein cows / J.A. Negrao, P.G. Marnet // Reproduction Nutrition Development. — 2006. — Vol. 46, No. 1. — P. 77–85. — DOI: 10.1051/rnd:2005068.